

Verfahren zur Bestimmung von Feuchte und Dichte eines dielektrischen
Materials

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Feuchte und/oder Dichte eines dielektrischen Materials in einem mit dem Material gefüllten Resonator mit Sender und Empfänger.

10 Die dielektrischen Eigenschaften eines Materials, beschrieben durch die komplexe, relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = \epsilon'_r - i\epsilon''_r$ können bei porösen Materialien durch Feuchte und Dichte beeinflusst werden. Feuchte und Dichte verändern somit auch die skalaren Parameter Resonanzfrequenz f_r und Resonatorgüte Q eines materialgefüllten Resonators gegenüber denen des leeren, mit Luft gefüllten Resonators (f_{r_0} und Q_0) in der Weise, dass

15 $f_{r_m} = \frac{f_{r_0}}{\sqrt{\epsilon'_r}}$ und $\frac{1}{Q_m} = \frac{1}{Q_0} + \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}$, wobei $1 \leq \epsilon'_r \leq \epsilon'_{r_{max}}$ und $0 \leq \epsilon''_r \leq \epsilon''_{r_{max}}$, worin $\epsilon'_{r_{max}}$ und $\epsilon''_{r_{max}}$ die Maximalwerte sind, die sich für das jeweilige Material aus dem zugeordneten Feuchte- und Dichtebereich ergeben.

20 Im Stand der Technik sind verschiedene Verfahren zur Messung der Feuchte oder Dichte granularer Materialien bekannt, bei denen das Resonanzverhalten eines materialgefüllten Resonators genutzt wird.

25 Beispielsweise ist aus US 566 60 61 ein Verfahren zur Messung von Feuchtigkeit in körnigen Materialien mittels Mikrowellen bekannt, bei dem während des Auf- und Abfahrens durch einen Frequenzbereich elektronisch auf eine Schwelle reagiert wird und aus den zeitlichen Eigenschaften derart erzeugter Pulse auf die Komponenten der Dielektrizitätskonstante geschlossen wird.

- 2 -

Alle Verfahren sind relativ langsam und weisen entweder eine Abhängigkeit von der Dichte des Materials oder relativ große Fehler bei der Bestimmung der Feuchte auf.

5

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, mit dem eine schnelle, genaue und dichteunabhängige Bestimmung der Feuchte möglich ist.

10

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe mit einem Verfahren, welches die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale enthält, gelöst.

15

Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Im Sinne der Erfindung kann im Folgenden als Bandbreite des Resonators jede beliebige, die Resonanzbreite beschreibende Größe angesehen werden, wobei entsprechende Anpassungen in den jeweiligen Definitionen, insbesondere der Grenzwerte, und Gleichungen vorzusehen sind.

20

Durch die digitale Aufnahme der Resonanzkurve ist eine schnelle Erfassung der Messwerte möglich und somit eine enge zeitlich-räumliche Zuordnung der daraus bestimmten Feuchte zu dynamisch durch den Resonator geführtem Material möglich. Die Erfindung sieht dazu vor, dass der Sender ein Signal abgibt, eine Resonanzkurve des gefüllten Resonators schrittweise abgetastet wird, wobei bei verschiedenen Frequenzen jeweils zugehörige Signalstärkewerte des Empfängersignals gemessen werden, für den gefüllten Resonator aus gemessenen Punkten die Resonanzfrequenz und die Bandbreite

25

- 3 -

ermittelt werden und durch Lösen eines zweiten Gleichungssystems, das die Resonanzfrequenzen und Bandbreiten des leeren und des gefüllten Resonators und bekannte Kalibrierungskoeffizienten des Resonators enthält, die Feuchte und/oder Dichte des Materials berechnet werden. Dieses Verfahren ermöglicht eine dichteunabhängige Bestimmung der Feuchte des Materials. Zudem kann mit geringem Aufwand die Dichte des Materials ermittelt werden.

Eine bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass aus den Punkten zum Ermitteln der Bandbreite des gefüllten Resonators entweder die Größen Resonanzfrequenz, Resonatorgüte und Resonanzmaximum ermittelt werden und daraus die Bandbreite berechnet wird oder Grenzfrequenzen ermittelt und daraus die Resonanzfrequenz und die Bandbreite berechnet werden.

In einer weiteren Ausgestaltung wird ein unterer Grenzwert errechnet und in dem Bereich, in dem die Signalstärkewerte größer als der Grenzwert sind, ein zweiter Abtastdurchgang mit kleineren Schrittweiten durchgeführt. Durch ein 2-Pass-Verfahren kann dabei die Genauigkeit erheblich gesteigert und der Zeitaufwand dennoch gering gehalten werden, besonders, wenn nur im Bereich des Resonanzpeaks eine verringerte Schrittweite im zweiten Abtastdurchgang genutzt wird.

Vorteilhafterweise erfolgt das Abtasten der Resonanzkurve in äquidistanten Schritten. Die einfachste und schnellste Form des Ab tastens besteht aus äquidistanten Schritten. Variable Schrittgrößen im zweiten Abtastdurchgang können dessen Dauer verkürzen.

Vorzugsweise wird der Sender mit konstanter Stärke betrieben. Durch eine konstante Signalstärke des Senders können die Messwerte am Empfänger ohne Anpassung oder Skalierung verwandt werden.

- 4 -

5 In einer möglichen Ausführungsform werden die Grenzfrequenzen des Resonators ermittelt, indem der Punkt mit dem höchsten Empfänger-Signalwert bestimmt und von diesem ausgehend ein Grenzwert berechnet wird und für positive und negative Steigungsabschnitte jeweils zwei benachbarte Punkte bestimmt werden, deren Signalwerte jeweils unter- und oberhalb des Grenzwerts liegen, und daraus erste und zweite Grenzfrequenzen berechnet werden, indem zwischen den jeweils benachbarten Punkten interpoliert wird. Die Ermittlung der Grenzfrequenzen mittels Interpolation zwischen 10 Punktpaaren, die einen Grenzwert umschließen, als Ausgangsparameter für die Bestimmung der Feuchte und/oder Dichte ist eine schnelle und einfache Methode.

15 Eine zweckmäßige Ausgestaltung sieht dabei vor, dass der Grenzwert einer Dämpfung von 3 dB gegenüber dem höchsten Signalwert entspricht. Wird der Grenzwert entsprechend einer Dämpfung um 3 dB ausgehend vom maximalen Signalstärke-Messwert gewählt, so erhalten die zu lösenden Gleichungen eine sehr einfache Form.

20 In einer alternativen Ausführungsform werden die Größen Resonanzfrequenz, Resonatorgüte und Resonanzmaximum des Resonators ermittelt werden, indem drei Punkte willkürlich und/oder zufällig ausgewählt werden und ein erstes Gleichungssystem, das aus drei für die drei Punkte geltenden Gleichungen einer analytische Resonanzkurve besteht, nach diesen Größen aufgelöst wird. 25 Noch schneller und mit geringerem Fehler als mit Interpolation lassen sich als Ausgangsparameter für die Bestimmung der Feuchte und/oder Dichte direkt die Resonanzfrequenz, die Resonatorgüte und die Resonanzamplitude ermitteln, indem ein aus drei Gleichungen bestehendes und somit vollständig bestimmtes erstes Gleichungssystem gelöst wird, wobei für je einen Punkt aus einer

- 5 -

Gruppe von dreien, welche aus der vorhandenen Menge ausgewählt werden, eine der drei Gleichungen gilt. Insbesondere verdrauschte Resonanzkurven können so genauer analysiert werden.

- 5 In einer weiteren alternativen Ausführungsform werden die Größen Resonanzfrequenz, Resonatorgüte, Resonanzmaximum des Resonators ermittelt werden, indem eine Menge von Punkten willkürlich und/oder zufällig ausgewählt wird, deren Anzahl ein ganzzahliges Vielfaches von drei ist und mindestens sechs beträgt, und die Punktemenge in drei gleich große Gruppen
- 10 unterteilt wird, für jede Kombination von drei Punkten, wobei jeder Punkt aus einer anderen Gruppe stammt, ein erstes Gleichungssystem, das aus drei für diese drei Punkte geltenden Gleichungen der analytische Resonanzkurve besteht, nach diesen Größen aufgelöst werden und für jede dieser Größen jeweils der Mittelwert aus den bei den Kombinationen errechneten Werten
- 15 gebildet wird. Noch exaktere Werte als mit drei Punkten werden erreicht, wenn aus der vorhandenen Punktemenge mehrere Dreiergruppen gebildet werden und die dabei erhaltenen Ausgangsparameter über alle Gruppen gemittelt werden.

- In einer zweckmäßigen Ausgestaltung ist dabei als Bedingung für die
- 20 willkürliche und/oder zufällige Auswahl der Punkte der Signalwert eines auszuwählenden Punktes größer als der um 3 dB gedämpfte höchste Signalwert. Bei beiden Verfahren mit drei Punkten oder einem Vielfachen davon werden vorzugsweise nur solche Punkte aus der Resonanzkurve gewählt, deren Signalstärke größer als der um 3 dB gedämpfte Maximalwert aller
- 25 Messwerte ist, da so nur aussagekräftige Punkte zum Einsatz kommen.

Das zu lösende zweite Gleichungssystem wird vorzugsweise so gewählt, dass es den Zusammenhang von Feuchte und Dichte zu Resonanzfrequenz- und

- 6 -

Resonatorgüteveränderung beziehungsweise zu Resonanzfrequenz- und Bandbreiteveränderung in guter Näherung beschreibt.

Zweckmäßigerweise ist das zweite Gleichungssystem nichtlinear.

5

In einer bevorzugten Ausführungsform wird das Abtasten mittels des Senders bis in den Mikrowellenbereich durchgeführt.

10

Vorteilhafterweise werden für die Messung des Empfängersignals Spannungs- oder Stromwerte des Empfängers benutzt. Zur Ermittlung der Resonanzkurve dient vorzugsweise die am Empfänger entstehende elektrische Spannung, da sie einfach und ohne Rückkopplung messbar ist. Es kann jedoch auch die Stromstärke in einem Empfängerkreislauf gemessen werden.

15

Im Folgenden wird für die gemessenen Größen der Einfachheit halber die Bezeichnung U_i benutzt, damit soll jedoch nicht die alleinige Verwendung der Spannung impliziert sein.

20

Die aus den diskreten Messpunkten zu rekonstruierende Resonanzkurve ist nur eine möglichst gute Annäherung an die reale Resonanzkurve. Sie wird durch den Verlauf der Signalamplitude U am Empfänger über der eingespeisten Frequenz f charakterisiert, wobei U_r das Resonanzmaximum und Q die Güte der Resonanz ist:

25

$$U = \frac{U_r}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{f}{f_r}-\frac{f_r}{f}\right)^2}}$$

Die Grenzfrequenzen f_a und f_b sind die Frequenzen, an denen die Signalstärke einen definierten Wert über- beziehungsweise unterschreitet. Vorzugsweise wird dafür der Wert entsprechend einer Dämpfung des Maximums um 3 dB gewählt: $U_a = U_b = \frac{U_r}{\sqrt{2}}$. Zwischen den Grenzfrequenzen und den

- 7 -

Kurvenparametern Resonanzfrequenz f_r und Resonatorgüte Q bestehen die Zusammenhänge: $f_r = \sqrt{f_a \cdot f_b}$, $Q = \frac{\sqrt{f_a f_b}}{f_b - f_a}$. Der Abstand zwischen den Grenzfrequenzen wird als Bandbreite $BW = f_b - f_a = \frac{f_r}{Q}$ definiert.

5

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert.

Dazu zeigen

10

Figur 1 eine abgetastete Resonanzkurve,

Figur 2 eine in einem 2-Pass-Verfahren abgetastete Resonanzkurve,

Figur 3 eine erste Methode zur Bestimmung der Resonanzparameter,

Figur 4 eine zweite Methode zur Bestimmung der Resonanzparameter,

Figur 5 eine dritte Methode zur Bestimmung der Resonanzparameter

15

und

Figur 6 eine flächenhafte Darstellung von Kalibrierungskurven.

20

In **Figur 1** sind zwei Resonanzkurve aufeinander dargestellt, wie sie mit dem erfindungsgemäßen Verfahren aufgenommen wurden, die rechte Resonanzkurve mit leerem, die linke Resonanzkurve mit materialgefülltem Resonator.

25

Durch Abtasten (Wobbeln) des Resonators zwischen der Startfrequenz f_{start1} und der Stoppfrequenz f_{stop1} wird die Resonanzkurve in diskreten Schritten erfasst. Die Startfrequenz wird aus der maximal verschobenen Frequenz $f_{rm} = \frac{f_{r0}}{\sqrt{\epsilon_{rmax}}}$, der maximal veränderten Güte $\frac{1}{Q_m} = \frac{1}{Q_0} + \epsilon''_{rmax}$, und dem

- 8 -

normierten Spannungsverhältnis $a = \frac{U_a}{U_{max}} < \frac{1}{\sqrt{2}}$ berechnet:

$$f_{start1} = -\frac{f_{rm}}{2Q_m} \sqrt{\frac{1-a^2}{a^2}} + \sqrt{\left(\frac{f_{rm}}{2Q_m}\right)^2 \cdot \frac{1-a^2}{a^2} + f_{rm}^2} . \text{ Die Stoppfrequenz ergibt sich mit}$$

$$f_r = f_{r0} \text{ zu : } f_{stop1} = -\frac{f_{r0}}{2Q_m} \sqrt{\frac{1-a^2}{a^2}} + \sqrt{\left(\frac{f_{r0}}{2Q_m}\right)^2 \cdot \frac{1-a^2}{a^2} + f_{r0}^2} .$$

- 5 Die Wobbelgeschwindigkeit hängt unter anderem von der Anzahl n_1 der Abtastpunkte ab und kann mit einem 2-Pass-Verfahren wie in **Figur 2** dargestellt erhöht werden. Dazu wird zuerst mit einer geringeren Anzahl von Abtastpunkten und demzufolge einer größeren Frequenzschrittweite $\Delta f_1 = \frac{f_{stop1} - f_{start1}}{n_1 - 1}$ abgetastet und anschließend im zweiten Schritt, nach vorheriger
- 10 Ermittlung der Start- und Stoppfrequenzen $f_{start2} = f|_{U \approx U_a \wedge f' > 0}$, $f_{stop2} = f|_{U \approx U_a \wedge f' < 0}$ oder $f_{start2} = f|_{U \approx U_a \wedge U < U_r}$, $f_{stop2} = f|_{U \approx U_a \wedge U > U_r}$ mit einer kleineren Frequenzschrittweite $\Delta f_2 = \frac{f_{stop2} - f_{start2}}{n_2 - 1}$ zwischen diesen Frequenzen erneut abgetastet.
- 15 Aus der abgetasteten, gemessenen Resonanzkurve können die Resonatorparameter f_r , Q und U_r beispielsweise nach dem fafb-, dem 3-Punkte- oder dem 3k-Punkte-Verfahren ermittelt werden. Andere Verfahren sind ebenfalls denkbar.
- 20 **Figur 3** zeigt das fafb-Verfahren, es basiert auf der direkten Ermittlung einer ersten und einer zweiten Grenzfrequenz f_a, f_b aus der gemessenen Resonanzkurve. Dazu wird zuerst der Punkt oder auch Abtastpunkt ($f = f_{max} / U = U_{max}$) mit der höchsten Spannung $U = U_{max}$ zur Berechnung einer 3-dB-Grenzlinie $U_{3dB} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$ bestimmt. Anschließend werden die jeweils
- 25 beiden Punkte in unmittelbarer Nähe der 3-dB-Grenzlinie ermittelt. Durch lineare Interpolation zwischen den Abtastpunkten a1 und a2 sowie b1 und b2 erhält man die erste und die zweite 3-dB-Grenzfrequenz f_a, f_b :

- 9 -

$$f_a = f_{a1} + \frac{\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} - U_{a1}}{U_{a2} - U_{a1}} (f_{a2} - f_{a1}), \quad f_b = f_{b1} + \frac{\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} - U_{b1}}{U_{b2} - U_{b1}} (f_{b2} - f_{b1})$$

Aus den Gleichungen $f_r = \sqrt{f_a \cdot f_b}$, $Q = \frac{\sqrt{f_a f_b}}{f_b - f_a}$ können f_r und Q berechnet werden. Die Resonanzspannung U_r ergibt sich dann zu:

$$U_r = U_{max} \cdot \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f_{max}}{f_r} - \frac{f_r}{f_{max}} \right)^2}.$$

5

Die Berechnung der Grenzfrequenzen ist durch die Diskretisierung der Resonanzkurve mehr oder weniger stark fehlerbehaftet - einmal durch die von U_{max} abgeleitete Bestimmung der 3-dB-Grenzlinie ($U_a = U_{max}/\sqrt{2} \leq U_r/\sqrt{2}$) und zum anderen durch die lineare Interpolation zwischen den Abtastpunkten a_1, a_2, b_1 und b_2 . Eine höhere Abtastrate verringert zwar die Fehler, verlängert aber auch gleichzeitig die Abtastzeit und senkt damit die Wobbelgeschwindigkeit. Allenfalls eine nichtlineare Interpolation ist bei diesem Verfahren zur Verbesserung der Genauigkeit möglich.

10

15

Beim in **Figur 4** dargestellten 3-Punkte-Verfahren werden willkürlich oder durch einen Zufallsgenerator drei Abtaststellen U_1, U_2, U_3 vorzugsweise oberhalb der Linie $U_s = s \cdot U_{max}$ mit $s < \frac{1}{\sqrt{2}}$ ausgesucht.

Durch Lösen des ersten Gleichungssystems G1:

20

$$U_1 = \frac{U_r}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f_1}{f_r} - \frac{f_r}{f_1} \right)^2}}, \quad U_2 = \frac{U_r}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f_2}{f_r} - \frac{f_r}{f_2} \right)^2}}, \quad U_3 = \frac{U_r}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f_3}{f_r} - \frac{f_r}{f_3} \right)^2}}$$

erhält man die Resonatorparameter f_r , Q und U_r :

$$f_r = \sqrt{\frac{U_1^2(U_3^2 - U_2^2)f_1^2 + U_2^2(U_1^2 - U_3^2)f_2^2 + U_3^2(U_2^2 - U_1^2)f_3^2}{\frac{U_1^2(U_3^2 - U_2^2)}{f_1^2} + \frac{U_2^2(U_1^2 - U_3^2)}{f_2^2} + \frac{U_3^2(U_2^2 - U_1^2)}{f_3^2}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{U_1^2 - U_2^2}{U_2^2 \left(\frac{f_2}{f_r} - \frac{f_r}{f_2} \right)^2 - U_1^2 \left(\frac{f_1}{f_r} - \frac{f_r}{f_1} \right)^2}}$$

$$U_r = U_1 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f_1}{f_r} - \frac{f_r}{f_1} \right)^2}$$

25

- 10 -

Der Vorteil des 3-Punkte-Verfahrens gegenüber dem fafb-Verfahren liegt darin, dass keine Fehler durch die Diskretisierung der Resonanzkurve auftreten und zum Abtasten der Resonanzkurve nur wenige Punkte benötigt werden und somit eine hohe Wobbelgeschwindigkeit erreicht wird.

5

Ist die Resonanzkurve verrauscht, dann werden mit dem 3-Punkte-Verfahren auch fehlerbehaftete Resonatorparameter ermittelt. Um den Einfluss des Rauschens zu verringern, werden mehr als drei Abtastpunkte ausgewählt, und zwar eine Anzahl $3 \cdot k$, $k = 2, 3, 4, \dots$, und in drei Gruppen M1, M2, M3 mit je k Punkten oberhalb der Linie $U_s = s \cdot U_{max}$ verteilt. Figur 5 zeigt dieses 3k-Punkte-Verfahren. Für alle der k^3 Möglichkeiten, jeweils einen Punkt aus jeder der drei Gruppen miteinander zu kombinieren, werden nach dem oben beschriebenen 3-Punkte-Verfahren die Resonatorparameter aus dem ersten Gleichungssystem G1 berechnet und die k^3 Teilergebnisse anschließend gemittelt: $f_r = \frac{1}{k^3} \sum_{j=1}^{k^3} f_{rj}$, $Q = \frac{1}{k^3} \sum_{j=1}^{k^3} Q_j$, $U_r = \frac{1}{k^3} \sum_{j=1}^{k^3} U_{rj}$.

15

Um Feuchte und Dichte aus ermittelten Resonatorparametern zu bestimmen, ist es erforderlich, dass die benutzte Anordnung mit Materialien bekannter Feuchte und Dichte kalibriert wird. Die Kalibrierung erfolgt zweckmäßigerweise außerhalb des Normalbetriebs.

20

Bei der Kalibrierung werden den Stoffgrößen Feuchtegehalt ψ und Dichte ϱ die elektrischen Resonatorwerte Resonanzfrequenz f_r , Resonatorgüte Q beziehungsweise Bandbreite BW ($BW = f_r/Q$) zugeordnet. Diese Zuordnung zwischen den stofflichen und den elektrischen Werten ist nichtlinear und kann mit hinreichender Genauigkeit für einen definierten Feuchte- und Dichtebereich beispielsweise durch folgendes zweites Gleichungssystem G2 beschrieben werden:

25

$$\Delta f_r = a_{f_{r2}} \varrho^2 \psi^2 + a_{f_{r1}} \varrho \psi^2 + b_{f_{r2}} \varrho^2 \psi + b_{f_{r1}} \varrho \psi + c_{f_{r2}} \varrho^2 + c_{f_{r1}} \varrho$$

- 11 -

$$\Delta BW = a_{BW_2} \varrho^2 \psi^2 + a_{BW_1} \varrho \psi^2 + b_{BW_2} \varrho^2 \psi + b_{BW_1} \varrho \psi + c_{BW_2} \varrho^2 + c_{BW_1} \varrho$$

Δf_r und ΔBW sind die Differenzen von Resonanzfrequenz beziehungsweise Bandbreite vom leeren zum materialgefüllten Resonator:

5 $\Delta f_r = f_{r_0} - f_{r_m}, \Delta BW = BW_m - BW_0$

Aufgabe der Kalibrierung ist es nun, für das jeweilige Material die zwölf Kalibrierungskoeffizienten

10 $a_{f_{r1}}, a_{f_{r2}}, b_{f_{r1}}, b_{f_{r2}}, c_{f_{r1}}, c_{f_{r2}}, a_{BW_1}, a_{BW_2}, b_{BW_1}, b_{BW_2}, c_{BW_1}, c_{BW_2}$ aus einer hinreichend großen Anzahl von Kalibrierwerten (Δf_r und ΔBW mit den dazugehörigen Stoffwerten ψ und ϱ) zu bestimmen.

Dazu werden die Messwerte von Differenzresonanzfrequenz Δf_r und Differenzbandbreite ΔBW den Feuchte- und Dichtewerten, die mit entsprechenden Referenzverfahren ermittelt wurden, zugeordnet. Diese Kalibrierwerte, die die Resonanzfrequenz und Bandbreite in Abhängigkeit von Feuchte und Dichte kennzeichnen, sind die Basis für die Kalibrierkoeffizientenermittlung. Die Regression der Kalibrierwerte mit gleicher Feuchte erfolgt in der Form $\Delta f_r = d_{f,2} \varrho^2 + d_{f,1} \varrho$ und

20 $\Delta f_r = d_{BW,2} \varrho^2 + d_{BW,1} \varrho$, wobei die Regressionskurven durch den Ursprung gehen müssen, da für den leeren Resonator (Luft mit $\varrho = 0$) auch Δf_r und ΔBW gleich Null sind. Die Regression liefert Kalibrierpunkte gleicher Dichte in Abhängigkeit von der Feuchte. Mit diesen wird eine erneute Regression der Form $\Delta f_r = a_f \psi^2 + b_f \psi + c_f$ und $\Delta BW = a_{BW} \psi^2 + b_{BW} \psi + c_{BW}$ durchgeführt.

25 Die so ermittelten Werte für die Regressionskoeffizienten a_f, b_f, c_f und a_{BW}, b_{BW}, c_{BW} werden über der Dichte aufgetragen und daraus die Kalibrierkoeffizienten mittels quadratischer Regression bestimmt.

- 12 -

Figur 6 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung in Form einer Kurvenschar, die auch zur Auswertung dient.

5 Aus den gemessenen Differenzresonanzfrequenz- und Differenzbandbreitewerten Δf_r und ΔBW werden für das entsprechende Material Feuchtegehalt ψ und Dichte ρ durch Lösen des obigen zweiten Gleichungssystems G2 berechnet.

10 Dabei ergeben sich zwei reelle und zwei imaginäre Wurzeln. Ob es für den interessierenden Feuchte- und Dichtebereich nur eine reelle Lösung gibt, kann aus dem Verlauf der Kalibrierkurven im Δf_r - ΔBW -Diagramm ermittelt werden. Im Δf_r - ΔBW -Diagramm wird die Differenzbandbreite in Abhängigkeit von der Differenzresonanzfrequenz für Kurven gleicher Dichte und Feuchte dargestellt. Ist der Verlauf dieser Kurven im interessierenden Feuchte- und Dichtebereich, 15 gekennzeichnet durch die Punkte A, B, C und D in Figur 6, stetig und eindeutig, dann existiert in diesem Bereich nur eine reelle Lösung.

Für das Lösen des zweiten Gleichungssystems G2 selbst bietet sich ein Iterationsverfahren an. Dazu wird das zweite Gleichungssystem G2 nach ψ 20 aufgelöst:

$$\psi = -\frac{b_{fr2}\rho + b_{fr1}}{2a_{fr2}\rho + 2a_{fr1}\rho} + \sqrt{\left(\frac{b_{fr2}\rho + b_{fr1}}{2a_{fr2}\rho + 2a_{fr1}\rho}\right)^2 - \frac{c_{fr2}\rho^2 + c_{fr1} - \Delta f_{r0}}{a_{fr2}\rho^2 + a_{fr1}\rho}}$$

$$\psi = -\frac{b_{BW2}\rho + b_{BW1}}{2a_{BW2}\rho + 2a_{BW1}\rho} + \sqrt{\left(\frac{b_{BW2}\rho + b_{BW1}}{2a_{BW2}\rho + 2a_{BW1}\rho}\right)^2 - \frac{c_{BW2}\rho^2 + c_{BW1} - \Delta BW_0}{a_{BW2}\rho^2 + a_{BW1}\rho}}$$

25 Aus dem Schnittpunkt beider Gleichungen in einem Feuchte-Dichte-Diagramm erhält man die gesuchten Werte für ψ und ρ .

BEZUGSZEICHENLISTE

5	f_r	Resonanzfrequenz im allgemeinen Fall
	f_{r_0}	Resonanzfrequenz des leeren Resonators
	f_{r_m}	Resonanzfrequenz des gefüllten Resonators
	f_{start1}, f_{stop1}	Start- und Stoppfrequenzen für ersten Abtastdurchgang
10	U_{max}	Größter gemessener Signalstärkewert
	a, s	Grenzwertfaktoren
	f_{start2}, f_{stop2}	Start- und Stoppfrequenzen für zweiten Abtastdurchgang
	f_{max}	Frequenz, bei der der größte Signalstärkewert vorliegt
15	$(f_{a1}/U_{a1}), (f_{a2}/U_{a2})$	Benachbarte Punkte der ersten Grenzfrequenz
	$(f_{b1}/U_{b1}), (f_{b2}/U_{b2})$	Benachbarte Punkte der zweiten Grenzfrequenz
	$(f_1/U_1) \dots (f_3/U_3)$	Drei ausgewählte Punkte
	M1, M2, M3	Punktgruppen
20	$(f_{11}/U_{11}) \dots (f_{14}/U_{14})$	Elemente Punktgruppe M1
	$(f_{21}/U_{21}) \dots (f_{24}/U_{24})$	Elemente Punktgruppe M2
	$(f_{31}/U_{31}) \dots (f_{34}/U_{34})$	Elemente Punktgruppe M3
	A,B,C,D	Grenzen des interessierenden Feuchte- und Dichtebereichs
25		

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Bestimmung von Feuchte (ψ) und/oder Dichte (ρ) eines dielektrischen Materials in einem mit dem Material gefüllten Resonator mit Sender und Empfänger, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- der Sender ein Signal abgibt,
 - eine Resonanzkurve des gefüllten Resonators schrittweise abgetastet wird, wobei bei verschiedenen Frequenzen (f_i) jeweils zugehörige Signalstärkewerte (U_i) des Empfängersignals gemessen werden,
 - für den gefüllten Resonator aus gemessenen Punkten (f_i/U_i) die Resonanzfrequenz (f_{rm}) und die Bandbreite (BW_m) ermittelt werden und
 - durch Lösen ~~ung~~ eines zweiten Gleichungssystems (G2), das die Resonanzfrequenzen (f_{r0}, f_{rm}) und Bandbreiten (BW_0, BW_m) des leeren und des gefüllten Resonators und bekannte Kalibrierungskoeffizienten ($a_{f_{r1}}, a_{f_{r2}}, b_{f_{r1}}, b_{f_{r2}}, c_{f_{r1}}, c_{f_{r2}}, a_{f_{bw1}}, a_{f_{bw2}}, b_{f_{bw1}}, b_{f_{bw2}}, c_{f_{bw1}}, c_{f_{bw2}}$) des Resonators enthält, die Feuchte (ψ) und/oder Dichte (ρ) des Materials berechnet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus den Punkten (f_i/U_i) zum Ermitteln der Bandbreite (BW_m) des gefüllten Resonators entweder die Größen Resonanzfrequenz (f_{rm}), Resonatorgüte (Q_m) und Resonanzmaximum (U_{rm}) ermittelt werden und daraus die Bandbreite (BW_m) berechnet wird oder Grenzfrequenzen (f_{am}, f_{bm}) ermittelt und daraus die Resonanzfrequenz (f_{rm}) und die Bandbreite (BW_m) berechnet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein unterer Grenzwert (U_a) errechnet wird und in dem Bereich, in dem die

- 15 -

Signalstärkewerte (U_i) größer als der Grenzwert sind, ein zweiter Abtastdurchgang mit kleineren Schrittweiten durchgeführt wird.

5 4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Abtasten der Resonanzkurve in äquidistanten Schritten (Δf_1 , Δf_2) erfolgt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Sender mit konstanter Stärke betrieben wird.

10 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Grenzfrequenzen (f_a , f_b) des Resonators ermittelt werden, indem

- der Punkt (f_i/U_i) mit dem höchsten Empfänger-Signalwert (U_{max}) bestimmt und von diesem ausgehend ein Grenzwert (U_g) berechnet wird und
- für positive und negative Steigungsabschnitte jeweils zwei benachbarte

15 Punkte (f_i/U_i , f_{i+1}/U_{i+1}) bestimmt werden, deren Signalwerte (U_i , U_{i+1}) jeweils unter- und oberhalb des Grenzwerts (U_g) liegen, und daraus erste und zweite Grenzfrequenzen (f_a , f_b) berechnet werden, indem zwischen den jeweils benachbarten Punkten (f_i/U_i , f_{i+1}/U_{i+1}) interpoliert wird.

20 7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Grenzwert (U_g) einer Dämpfung von 3 dB gegenüber dem höchsten Signalwert (U_{max}) entspricht.

25 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Größen Resonanzfrequenz (f_r), Resonatorgüte (Q) und Resonanzmaximum (U_r) des Resonators ermittelt werden, indem

- drei Punkte (f_i/U_i) willkürlich und/oder zufällig ausgewählt werden und

- 16 -

- ein erstes Gleichungssystem (G1), das aus drei für die drei Punkte (f_i/U_i) geltenden Gleichungen der einer analytische Resonanzkurve besteht, nach den diesen Größen (f_r , Q , U_r) aufgelöst wird.

- 5 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Größen Resonanzfrequenz (f_r), Resonatorgüte (Q), Resonanzmaximum (U_r) des Resonators ermittelt werden, indem
- eine Menge von Punkten (f_i/U_i) willkürlich und/oder zufällig ausgewählt wird, deren Anzahl ein ganzzahliges Vielfaches von drei ist und mindestens
 - 10 sechs beträgt, und die Punktemenge in drei gleich große Gruppen (M_1 , M_2 , M_3) unterteilt wird,
 - für jede Kombination von drei Punkten (f_i/U_i), wobei jeder Punkt (f_i/U_i) aus einer anderen Gruppe (M_1 , M_2 , M_3) stammt, ein erstes Gleichungssystem (G1), das aus drei für diese drei Punkte (f_i/U_i) geltenden Gleichungen der
 - 15 analytische Resonanzkurve besteht, nach diesen Größen (f_{rk} , Q_k , U_{rk}) aufgelöst werden und
 - für jede dieser Größen (f_r , Q , U_r) jeweils der Mittelwert aus den bei den Kombinationen errechneten Werten (f_{rk} , Q_k , U_{rk}) gebildet wird.
- 20 10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Bedingung für die willkürliche und/oder zufällige Auswahl der Punkte (f_i/U_i) der Signalwert (U_i) eines auszuwählenden Punktes (f_i/U_i) größer als der um 3 dB gedämpfte höchste Signalwert (U_{max}) ist.
- 25 11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite Gleichungssystem (G2) den Zusammenhang zwischen Feuchte (ψ) und Dichte (ρ) einerseits und Resonanzfrequenz (f_r) und Resonatorgüte (Q) oder Resonanzfrequenz (f_r) und Bandbreite (BW)

- 17 -

andererseits in einem vorgegebenen Feuchte- und Dichtebereich nur näherungsweise beschreibt.

5 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite Gleichungssystem (G2) nichtlinear ist.

10 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Abtasten mittels des Senders bis in den Mikrowellenbereich durchgeführt wird.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Messung des Empfängersignals Spannungs- oder Stromwerte des Empfängers benutzt werden.



